MINISTÈRE DE L'INDUSTRIE ET DE LA RECHERCHE

BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES

SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL
B.P. 6009 – 45018 Orléans Cédex – Tél.: (38) 66.06.60

Programme CADOUDAL

Simulation transitoire d'un doublet hydrothermique placé dans un écoulement naturel avec fuites thermiques à travers les épontes

Manuel d'utilisation

par

A.-C. GRINGARTEN – P.-A. LANDEL – J.-P. SAUTY

Département géothermie
B.P. 6009 – 45018 Orléans Cédex – Tél.: (38) 66.06.60

Département géologie de l'aménagement
Hydrogéologie
B.P. 6009 – 45018 Orléans Cédex – Tél.: (38) 66.06.60

74 SGN 336 GTH

Octobre 1974

RESUME

L'exploitation des eaux naturellement chaudes, pour le chauffage urbain par exemple, ou l'utilisation des eaux des nappes superficielles pour la climatisation ou le refroidissement d'installations telles que centrales nucléaires, conduit dans de nombreux cas à mettre en exploitation des doublets hydrothermiques (réinjection dans un second puits de l'eau prélevée dans le puits de production après abaissement ou élévation de sa température).

Le présent rapport expose le mode d'utilisation du programme CADOUDAL qui permet de simuler, par une méthode rapide et efficace, le comportement thermique d'un aquifère soumis à un doublet, donc finalement de choisir les caractéristiques de l'installation (positions et débits des puits) en fonction de leurs conséquences sur les températures d'exhaure et, le cas échéant, leur impact sur le milieu naturel (pollution thermique éventuelle de l'aquifère).

TABLE DES MATIERES

RESUME

TABLE DES MATIERES

1. INTRODUCTION
   1.1. Généralités
   1.2. Conditions de validité

2. EQUATIONS REGISSANT LES PHENOMENES HYDRODYNAMIQUES ET THERMODYNAMIQUES DE RECYCLAGE
   2.1. Notations
   2.2. Méthode de résolution
   2.3. Etude du potentiel hydrodynamique
   2.4. Etude des échanges thermiques
      2.4.1. Relation entre chaleurs spécifiques
      2.4.2. Equation thermodynamique de l'aquifère
      2.4.3. Equation thermodynamique des épontes
      2.4.4. Expression de la température en un point de l'aquifère

3. DESCRIPTION DU PROGRAMME
   3.1. Résultats fournis par CADOUDAL
   3.2. Algorithme

4. UTILISATION DE CADOUDAL

5. PROGRAMME ABAQUE

1. INTRODUCTION

1.1. Généralités

L'exploitation de l'énergie thermique contenue dans les nappes d'eau chaude conduit à mettre en place des forages d'exploitation ; mais d'une part les exhaures peuvent conduire à des rabattements prohibitifs, et d'autre part il se peut que l'on ne puisse, à l'issue du traitement, évacuer l'eau dans les réseaux de surface à cause d'une température résiduelle trop élevée ou d'une mauvaise qualité chimique.

Une solution fréquemment adoptée consiste à réinjecter cette eau dans un second puits : le dispositif résultant sera désigné dans ce rapport sous le nom de "doublet hydrothermique", constitué de deux puits dont le second réinjecte le débit prélevé par le premier, mais à une température différente du premier. Le doublet hydrothermique présente cependant un inconvénient : après un délai plus ou moins grand, une partie du débit réinjecté peut parvenir au puits d'exhaure (recyclage) et refroidir l'eau extraite du forage diminuant ainsi la production d'énergie. Le recyclage est fonction des caractéristiques des ouvrages (débit et espacement des puits) ainsi que des paramètres hydrodynamiques et thermiques de l'aquifère ; il peut être atténué par des pertes thermiques à travers les épontes, ou par la présence d'un gradient naturel dans la nappe.

Un problème tout à fait similaire et qui se traite exactement de la même façon, est celui du doublet de refroidissement dans lequel on prélève l'eau de la nappe pour la réinjecter dans un second puits à une température plus élevée.

Le choix du dispositif : emplacements et débits des puits conduit à calculer le comportement thermique de l'aquifère soumis au doublet et, notamment, à déterminer les caractéristiques du recyclage (pourcentage d'eau recyclée et date d'apparition du recyclage), dans les différents cas de figures retenus. C'est dans ce but qu'a été élaboré le programme CADOUDAL (CAlcul du DOUblet Défini AnaLytiquement). Ce programme simule la mise en service d'un doublet hydrothermique, calculant l'évolution des températures de l'aquifère et de l'eau extraite du puits de production ainsi que les positions successives du front thermique moyennant quelques hypothèses simplificatrices : régime hydraulique permanent, prépondérance dans l'aquifère des transferts de chaleur par convection forcée et à travers les épontes

de la conduction verticale.

Ces hypothèses, très souvent justifiées tant que les températures ne sont pas trop élevées, permettent d'utiliser des méthodes de calcul rapides et efficaces qui conduisent à des temps d'exécution de l'ordre de 100 fois plus courts que les méthodes générales avec découpage en différences ou éléments finis, et évitent l'écueil de phénomènes parasites tels que la dispersion numérique. (Ces méthodes générales restent toutefois nécessaires quand les modifications de température amènent des variations importantes de perméabilité, ou que la conduction et la dispersion thermique ne sont plus négligeables devant la convection.

Après un exposé des conditions d'applicabilité du programme CADOUDAL, on trouvera dans ce rapport un rappel des différentes équations régissant les phénomènes, puis une description du programme et, enfin, un mode d'emploi (préparation des données) suivi d'une description du programme annexe ABAQUE, qui fournit une sortie graphique des résultats sur table traçante.

N.B. Le programme CADOUDAL pourra sans difficultés majeures être adapté à d'autres problèmes que celui du doublet, car les fonctions analytiques caractéristiques de cet écoulement (potentiel, fonction de courant, vitesse) interviennent dans des sous-programmes indépendants qui peuvent être changés sans toucher au corps du programme.

1.2. Conditions de validité

a) Dans la couche aquifère le transfert de chaleur se fait uniquement par convection ; les autres types de transfert (conductivité, dispersion cinématique et diffusion moléculaire) sont considérés comme négligeables devant la convection.

b) Les températures de l'eau et de la roche aquifère s'équilibrent instantanément (hypothèse généralement justifiée en milieu poreux).

c) Le régime hydraulique permanent est atteint de façon quasi instantanée, et n'est pas influencé par l'évolution des températures de l'aquifère.

d) L'aquifère est homogène et isotrope dans le plan horizontal.

e) Au sein de l'aquifère les charges et les températures sont supposées homogénéisées sur chaque verticale.

f) Le transfert de chaleur dans les épontes supposées imperméables, infinies et initialement isothermes, s'effectue uniquement par conduction verticale.

g) Les épontes sont supposées infinies et homogènes.

h) Initialement la couche aquifère et les épontes sont à la même température.

2. EQUATIONS REGISSANT LES PHENOMENES HYDRODYNAMIQUES ET THERMODYNAMIQUES

2.1. Notations

a demi distance entre les puits (D distance entre les deux puits ; D = 2a)

C chaleur spécifique

h hauteur utile de la couche aquifère

K conductivité thermique

ø porosité

q débit de production (égal au débit d'injection)

$S_{(M)}$ surface entre le point M et le point d'injection, comprise à l'intérieur d'un tube de courant

T température

v_o vitesse de l'écoulement naturel au sein de l'aquifère (= perméabilité x pente piézométrique)

ρ masse volumique

W potentiel hydraulique complexe $W = \phi + i\psi$

ϕ potentiel hydraulique

ψ fonction de courant

$$t_D = \frac{\rho_f C_f}{\rho_a C_a} \frac{q\ t}{D^2\ h}$$

$$\lambda = \frac{\rho_f C_f \times \rho_a C_a}{\rho_R C_R k_R} \frac{q\ h}{D^2}$$

$$Q_D = \frac{q}{hDV_o}$$

indices : a aquifère

D sans dimension

f fluide

i injection

o initial

R roche

2.2. Méthode de résolution

Etant donné les hypothèses énoncées au § 1.2. :

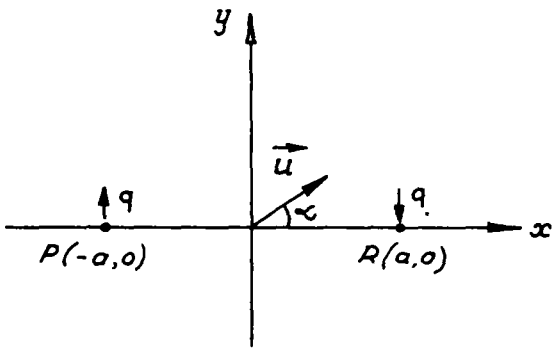
- le régime hydraulique est permanent et peut être représenté par une fonction potentiel complexe (hyp. c, hyp. d),

- il n'y a pas d'échanges thermiques entre deux tubes de courant voisins (hyp. a, hyp. f),

il est possible de calculer séparément l'évolution thermique dans chaque tube de courant dont l'équation est donnée par la fonction potentiel complexe découlant des conditions aux limites.

2.3. Etude du potentiel hydrodynamique

Le potentiel hydraulique induit dans le plan de l'aquifère par :



. l'écoulement naturel de vecteur vitesse uniforme $\vec{u}$ de module v_o et faisant l'angle α avec l'axe des x

. le prélèvement d'un débit q/h par unité d'épaisseur au point P(-a,o)

. la recharge du débit q/h par unité d'épaisseur au point R(+a,o)

s'écrit :

$$W = \phi + j\psi = - v_o e^{-i\alpha} + \frac{q/h}{2\pi} \text{Log} \frac{z + a}{z - a} \qquad \text{avec } z = x + iy$$

qui se décompose en :

$$\phi = - v_o (x \cos \alpha + y \sin \alpha) + \frac{q/h}{4\pi} \text{Log} \frac{(x + a)^2 + y^2}{(x - a)^2 + y^2}$$

$$\psi = v_o (x \sin \alpha - y \cos \alpha) + \frac{q/h}{2\pi} \text{Artg} \frac{2ay}{a^2 - x^2 - y^2} .$$

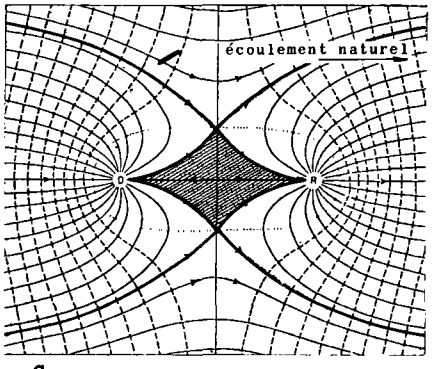
On démontre que suivant la valeur du rapport $Q_D = \frac{q}{hDV_o}$ et de l'angle α,

a) toute l'eau rechargée au puits R peut parvenir au puits P (recyclage total),

b) une partie de cette eau peut y parvenir, le reste étant entraîné par l'écoulement naturel (recyclage partiel),

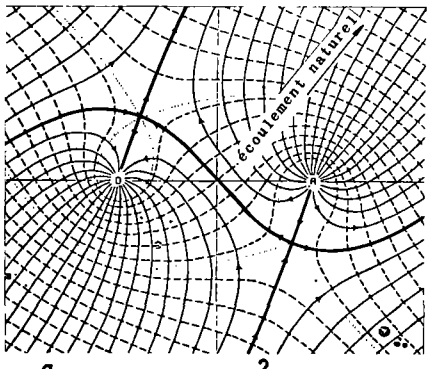
c) l'eau rechargée au puits R est entièrement entraînée au loin (recyclage nul).

A titre d'exemple nous donnons quelques réseaux d'écoulement caractéristiques, d'après J.A. DACOSTA et R.R. BENNETT (UGGI/AIHS, Helsinki, 1960).



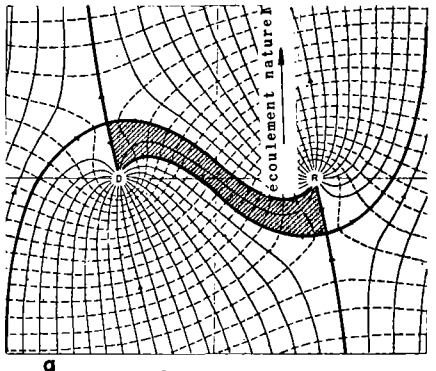
$\frac{q}{h_D V_0} = 2 \; ; \; \alpha = 0$

Recyclage partiel (4,4 %)



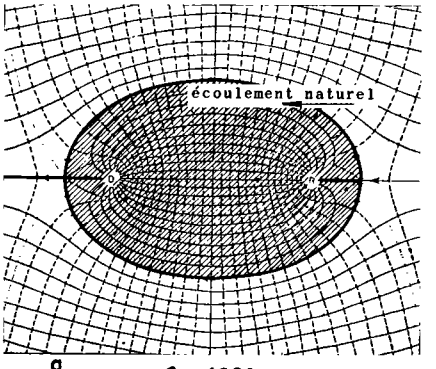
$\frac{q}{h_D V_0} = 2 \; ; \; \alpha = \text{Arcos } \frac{2}{\pi} \# 50°46$

Recyclage nul



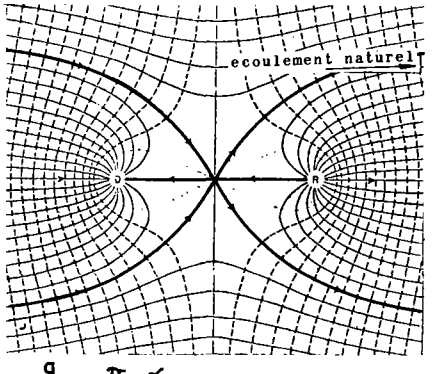
$\frac{q}{h_D V_0} = 2 \; ; \; \alpha = 90°$

Recyclage partiel (9%)



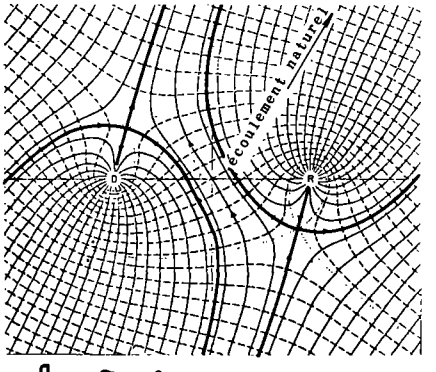
$\frac{q}{h_D V_0} = 2 \; ; \; \alpha = 180°$

Recyclage total



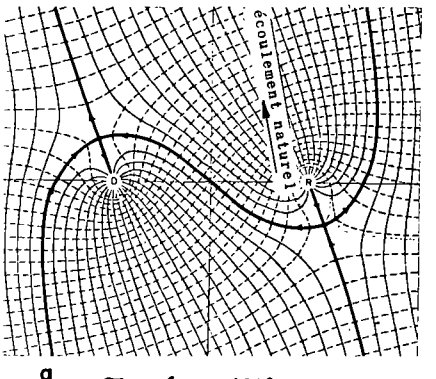
$\frac{q}{h_D V_0} = \frac{\pi}{2} \; ; \; \alpha = 0$

Recyclage nul



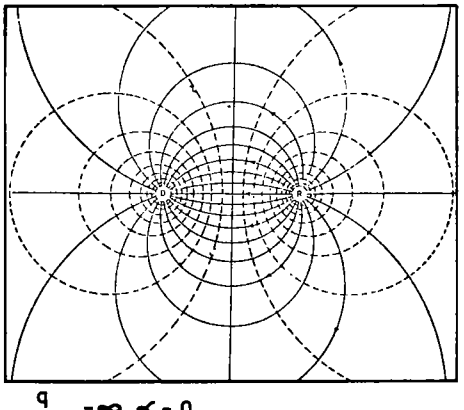
$\frac{q}{h_D V_0} = \frac{\pi}{2} \; ; \; \alpha = 60°$

Recyclage nul



$\frac{q}{h_D V_0} = \frac{\pi}{2} \quad \alpha \# 101°$

Recyclage nul



$\frac{q}{h_D V_0} = \infty \; ; \; \alpha = 0$

Recyclage total

On retiendra des trois premières figures que le recyclage n'est pas forcément minimal lorsque l'écoulement naturel s'oppose directement au flux du puits R vers le puits P ($\alpha = 0$) comme on pouvait intuitivement le penser. On démontre par exemple que pour $\frac{q}{hDV_o} = 2$ le seul angle qui annule le recyclage est $\alpha = \text{Arccos}\,\frac{2}{\pi} \# 50°$.

L'examen de ces réseaux d'écoulement montre par ailleurs que lorsqu'il y a recyclage, les lignes de courant recyclées (allant de R en P) sont toutes comprises entre les deux lignes de courant passant par les points d'arrêt (ou points de stagnation S et S').

Finalement, les équations obtenues en utilisant les variables réduites $X_D = \frac{x}{a}$, $Y_D = \frac{y}{a}$, $\frac{\phi}{q/h}$, $\frac{\psi}{q/h}$, $\frac{V_x}{q/h}$, $\frac{V_y}{q/h}$ et $Q_D = \frac{q}{hDV_o}$

$$\frac{\phi}{q/h} = -\frac{1}{2Q_D}(X_D \cos\alpha + Y_D \sin\alpha) + \frac{1}{4\pi}\left[\text{Log}\,\frac{(X_D+1)^2 + Y_D^2}{(X_D-1)^2 + Y_D^2}\right]$$

$$\frac{\psi}{q/h} = \frac{1}{2Q_D}(X_D \sin\alpha - Y_D \cos\alpha) + \frac{1}{2\pi}\left[\text{Arctg}\,\frac{Y_D}{X_D+1} - \text{Arctg}\,\frac{Y_D}{X_D-1}\right]$$

Et les composantes V_x et V_y de la vitesse au point X,Y s'écrivent :

$$\frac{V_x}{q/h} = \frac{\cos\alpha}{2Q_D} - \frac{1}{2\pi}\left[\frac{X_D+1}{(X_D+1)^2 + Y_D^2} - \frac{X_D-1}{(X_D-1)^2 + Y_D^2}\right]$$

$$\frac{V_y}{q/h} = \frac{\sin\alpha}{2Q_D} - \frac{Y}{2\pi}\left[\frac{1}{(X_D+1)^2 + Y_D^2} - \frac{1}{(X_D-1)^2 + Y_D^2}\right]$$

Quant aux coordonnées des points d'arrêt qui annulent $\frac{dW}{dz}$, ce sont :

$$X_{D_S} = \frac{+\varepsilon}{\sqrt{2}}\sqrt{1 - \frac{2Q_D}{\pi}\cos\alpha + \sqrt{1 + 4\left(\frac{Q_D}{\pi}\right)^2 - 4\,\frac{Q_D}{\pi}\cos\alpha}}$$

$$Y_{D_S} = \frac{-\varepsilon}{\sqrt{2}}\sqrt{-1 + \frac{2Q_D}{\pi}\cos\alpha + \sqrt{1 + 4\left(\frac{Q_D}{\pi}\right)^2 - 4\,\frac{Q_D}{\pi}\cos\alpha}}$$

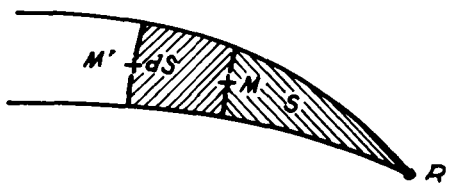
2.4. Etude des échanges thermiques

2.4.1. Relation entre chaleurs spécifiques

La composition des chaleurs spécifiques de l'eau et de la matrice rocheuse conduit à la relation suivante :

$$\rho_a C_a = \phi \rho_f C_f + (1 - \phi) \rho_R C_R$$

2.4.2. Equation thermodynamique de l'aquifère



Soit S la surface comprise entre le point courant M du tube de courant et le point d'injection R. Soit dS la variation de S quand on passe de M en M', et dq le débit passant dans le tube de courant.

L'équation de continuité des flux de chaleur dans l'élément de volume h x dS conduit à équilibrer 3 termes :

- un terme de stockage :

$$\rho_a C_a \frac{\partial T_f}{\partial t} h ds$$

- un terme résultant des flux entrant et sortant par convection :

$$- \rho_f C_f \cdot dq \cdot \frac{\partial T_f}{\partial S} dS$$

- un terme de pertes par les épontes :

$$+ 2k_R \left\{\frac{\partial T_R}{\partial z}\right\}_{z=\frac{h}{2}} dS$$

Le gradient est pris à la limite entre l'aquifère et les épontes, soit si l'on suppose l'ensemble symétrique par rapport au plan médian de l'aquifère, $z = \pm \frac{h}{2}$:

$$k_R \left\{\frac{\partial T_R}{\partial z}\right\}_{z=\frac{h}{2}} dS - k_R \left\{\frac{\partial T_R}{\partial z}\right\}_{z=\frac{-h}{2}} dS = 2k_R \left\{\frac{\partial T_R}{\partial z}\right\}_{z=\frac{h}{2}} dS$$

$$\rho_a C_a \frac{\partial T_f}{\partial t} h = - \rho_f C_f dq \cdot \frac{\partial T_f}{\partial S} + 2k_R \left\{\frac{\partial T_R}{\partial z}\right\}_{z=\frac{h}{2}}$$

soit

$$\frac{h}{2}\rho_a C_a \frac{\partial T_f}{\partial t} + \frac{dq}{2}\rho_f C_f \frac{\partial T_f}{\partial S} - k_R \left\{\frac{\partial T_R}{\partial z}\right\}_{z=\frac{h}{2}} = 0$$

avec pour condition initiale $T(S,t) = 0$

et les conditions aux limites $T(o,t) = T_i$.

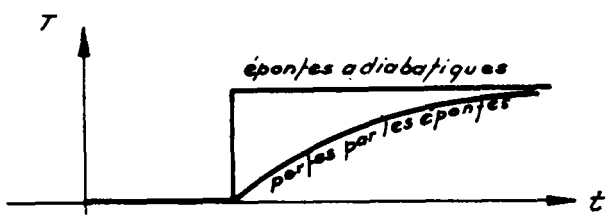
Si l'on néglige le troisième terme (pertes par les épontes), on est en présence d'un front thermique abrupt se déplaçant à la vitesse :

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\rho_f C_f}{\rho_a C_a} \frac{dq}{h} .$$

Or, $\frac{dq}{h}$ est la vitesse apparente de l'eau, ou vitesse de DARCY ; le front thermique est donc ralenti par rapport à la vitesse réelle du fluide dans le rapport :

$$\frac{V_{front}}{V_{fluide}} = \frac{\rho_f C_f}{\rho_a C_a} \times \frac{1}{\frac{1}{\phi}} = \frac{1}{1 + \frac{1-\phi}{\phi}\frac{\rho_R C_R}{\rho_f C_f}}$$

Si l'on ajoute les pertes par les épontes, le front ne sera plus abrupt : la montée en température sera retardée par le réchauffement progressif des épontes, pour n'atteindre sa température maximale qu'asymptotiquement, une fois que les épontes auront elles-mêmes atteint cette température.



2.4.3. Equation thermodynamique des épontes

Le transfert de chaleur s'y fait verticalement par conduction verticale :

$$\frac{\partial^2 T_R}{\partial z^2} = \frac{\rho_R C_R}{k_R} \frac{\partial T_R}{\partial t}$$

avec la condition initiale $T_R(S,z,o) = T_o \quad \forall\ z \geq \frac{h}{2}$

et les conditions aux limites $T_R(S, \frac{h}{2}, t) = T_f(S,h,t)$

$$\lim_{z\to\infty} T_R(S,z,t) = T_o$$

2.4.4. Expression de la température en un point de l'aquifère

On démontre (et celà fera l'objet d'une publication ultérieure) que la température d'un point de l'aquifère a pour expression :

$$\frac{T_f - T_o}{T_i - T_o} = \text{Erfc}\left[\frac{(\rho_f C_f)^2}{k_R \rho_R C_R}\left(\frac{Qd\psi}{dS}\right)^2 (t - t_{Front})\right]^{-1/2}$$

Cette équation est obtenue en considérant un tube de courant infiniment mince limité par les lignes de courant ψ et $\psi+d\psi$. La surface de ce tube, comprise entre le puits de réinjection et le point considéré, est dS.

t_{FRONT} est la date d'arrivée du front en ce point :

$$t_{FRONT} = \frac{\rho_A C_A}{\rho_f C_f}\ \frac{h}{Q}\ \frac{dS}{d\psi}$$

De plus, si l'on pose :

$$T_D = \frac{T_f - T_o}{T_i - T_o}$$

$$t_D = \frac{\rho_F C_F}{\rho_A C_A}\ \frac{Q}{D^2 h}\ t$$

$$dS_d = \frac{dS}{D^2}$$

$$\lambda = \frac{\rho_F C_F \cdot \rho_A C_A}{k_R \rho_R C_R}\ \frac{Qh}{D^2}$$

la température au puits de production s'obtient alors en appliquant la loi de mélange sur les lignes de courant parvenant au puits :
à l'instant t_D l'eau recyclée est contenue entre deux lignes de courant extrêmes dont les fonctions de courant ont pour valeur ψ_{min} et ψ_{max} et

$$T_D = \int_{\psi_{min}(t_D)}^{\psi_{max}(t_D)} \text{Erfc}\left\{\frac{dS_D}{d\psi} \cdot \left[\lambda\left\{t_D - \frac{dS_D}{d\psi}\right\}\right]^{-1/2}\right\} d\psi$$

Dans le cas du doublet de forage en tenant compte de la symétrie de centre O,

$$T_D = 2\int_{\psi_o}^{\psi_{max}(t_D)} \text{Erfc}\left\{\frac{dS_D}{d\psi} \cdot \left[\lambda \cdot \left\{t_D - \frac{dS_D}{d\psi}\right\}\right]^{-1/2}\right\} d\psi$$

3. DESCRIPTION DU PROGRAMME

3.1. Résultats fournis par CADOUDAL

3.1.1. Les lignes de courant sont fournies sous forme de tableaux à trois colonnes (annexe 1) donnant les coordonnées X,Y de chaque point sur une même ligne avec le temps de passage en ce point. En option ces lignes sont tracées (annexe 2).

3.1.2. Le taux de recyclage en fonction du temps t_D est fourni sous la forme d'un tableau (annexe 3) à 2 colonnes ; en option on peut faire perforer ces résultats et/ou les faire tracer sur traceur de courbes BENSON.

Les cartes perforées servent de données au programme ABAQUE qui superpose les différentes courbes calculées par plusieurs passages de CADOUDAL (cf. § 5).

3.1.3. En option les fronts thermiques sont tracés (annexe 4).

3.2. Algorithme

3.2.1. Une ligne de courant est une courbe sur laquelle la valeur de la fonction ψ est constante.

3.2.1.1. Choix des différentes valeurs ψ_n pour le calcul des lignes de courant.

Les courbes de recyclage sont celles qui partent du puits d'injection et arrivent au puits de pompage, les autres courbes sont appelées courbes extérieures.

On choisit les différentes valeurs ψ_n en distinguant le cas des courbes de recyclage et celui des courbes extérieures :

- Cas des courbes de recyclage :

On calcule les coordonnées des points d'arrêt et on retient celui qui a une ordonnée positive.

. Si ce point est en dehors du cadre prévu pour le tracé (même si l'on ne veut pas de tracé, on doit préciser en entrée les dimensions de ce cadre, cf. § 4.1.), les valeurs de ψ_n sont choisies en divisant la valeur Y2 (donnée en paramètre) par le nombre de courbes à calculer (NPSI, fourni en paramètre), on obtient ainsi Δy et les valeurs ψ_n sont

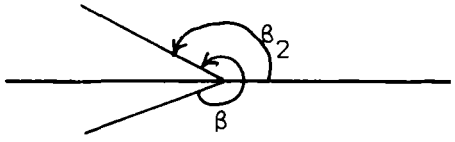
$$\psi_n = \psi(o, n\Delta y).$$

. dans le cas contraire, on calcule $\Delta\psi = (\psi_s - \psi_o)/NPSI$

et $\psi_n = \psi_o + n.\Delta\psi$

- Cas des courbes extérieures :

La région autour du puits d'injection, qui n'est pas concernée par le recyclage, couvre un angle β.



En divisant β par le nombre de courbes extérieures à tracer, on obtient $\Delta\beta$ et avec r = valeur RAYØN 2 (fournie en paramètre) :

$$\psi_n = \psi \left(1 + r \cos(\beta_2 - n\Delta\beta), r \sin (\beta_2 - n\Delta\beta)\right).$$

3.2.1.2. Calcul des lignes

Soit une valeur ψ_n et un point de départ A_1 ; la ligne correspondant à ψ_n sera calculée point par point de A_1 à A_m de la façon suivante :

soit A_p le point de coordonnées (x_p, y_p) appartenant à la ligne ψ_n, on a :

$$|\psi(A_p) - \psi_n| \leq \varepsilon_1 .$$

Pour trouver le point suivant A_{p+1}, on dispose de deux méthodes :

a) Calcul des vitesses de DARCY en A_p : v_{x_p} et v_{y_p}.

On déduit $A_{p+1} = (x_{p+1}, y_{p+1})$

$$= (x_p + v_{x_p}.\Delta t, y_p + v_{y_p}.\Delta t)$$

(Δt : pas de temps fixé au départ en A_1).

On vérifie $|\psi(A_{p+1}) - \psi_n| \leq \varepsilon_1$

ε_1 paramètre fourni dans les données.

Si cette inégalité est vérifiée, on passe à A_{p+2}, sinon on essaie la deuxième méthode pour se recaler sur la courbe ψ_n avec une meilleure précision.

b] $A_{p+1} = (x, y_p + v_{y_p}.\Delta t)$ ou $A_{p+1} = (x_p + v_{x_p}.\Delta t, y)$ avec

x ou y déterminé par approximations successives (recherche du zéro de la fonction : $\psi(A_{p+1}) - \psi_n$ jusqu'à ce que :

$$|\psi(A_{p+1}) - \psi_n| \leq \varepsilon_2 \qquad \varepsilon_2 < \varepsilon_1$$

(ε_2 fourni en paramètre).

Il est possible que la méthode utilisée (dichotomie dans un intervalle limité sur une fonction monotone) ne donne pas la solution (généralement parce que la solution ne se trouve pas entre les bornes déterminées automatiquement). On repart alors du dernier point précédemment calculé par cette deuxième méthode et on refait le même travail mais avec un pas de temps Δt plus petit.
(Dans le cas des courbes de recyclage, ce Δt ne pourra que décroître, par contre pour les courbes extérieures un processus de croissance a été prévu. On multiplie le Δt par un facteur d'accélération à chaque nouveau pas de temps).

3.2.2. Lorsque l'on a terminé une courbe de recyclage, t_D étant le temps d'arrivée de cette dernière courbe, on intègre les pertes par les épontes à l'aide de la formule suivante :

$$T_{FD} = 2 \int_{\psi(t_D)}^{\psi_o} \mathrm{Erfc} \left\{ \frac{dS}{d\psi} \left[\lambda \left[t_D - \frac{dS}{d\psi} \right] \right]^{1/2} \right\} d\psi$$

Cette intégrale est évaluée par la méthode des trapèzes. t_D et $\frac{dS}{d\psi}$ sont calculés en même temps que les courbes ψ.

3.2.3. Quand toutes les lignes de courant sont calculées et mémorisées point par point avec le temps de passage en chacun de ces points (groupements x, y, t), il est possible alors de demander le tracé des fronts thermiques à différentes dates, par interpolation sur les temps entre les (x, y, t) d'une ligne de courant.
(Les dates des fronts sont déterminées par le programme ou fournies en paramètre ; cf. § 4).

4. MODE D'EMPLOI

Certaines données sont facultatives ; lorsque l'on ne veut pas les préciser on leur donne une valeur nulle, le programme leur affecte la valeur standard qui a été fixée dans CADOUDAL.

Dans la liste descriptive suivante, s'il y a une indication dans la dernière colonne intitulée "valeur standard", la donnée concernée est facultative.

N.B. Le contenu de la zone réservée au nom de la variable n'est que mnémotechnique et ne coïncide pas obligatoirement avec le nom utilisé dans le programme.

1ère carte FØRMAT(5(8X,G8.0))	nom de la variable	zone contenant le nom (colonnes)	zone contenant la valeur (colonnes)	type	valeur standard
1) q/hDV_0	QHSDVO=	1 à 8	9 à 16	flottant	
2) angle α de l'écoulement naturel avec l'axe reliant les 2 puits	ALPHA =	17 à 24	25 à 32	flottant	
3) coefficient λ faisant intervenir la perte par les épontes	LAMBDA =	33 à 40	41 à 48	flottant	
4) nombre de lignes de courant participant au recyclage que l'on veut tracer	NPSI =	49 à 56	57 à 64	entier	
5) nombre de lignes que l'on veut calculer sans tracé, entre deux courbes effectivement tracées. Ceci pour avoir un plus grand nombre de points sur la courbe : T_{FD} en fonction de t_D. Cette variable doit être supérieure ou égale à 1.	INT =	65 à 72	73 à 80	entier	
2ème carte FØRMAT(5(8X,G8.0))					
1) nombre de lignes de courant extérieures que l'on veut calculer	NPSEXT=	1 à 8	9 à 16	entier	
2) ε_1 : erreur tolérée lorsque l'on calcule un nouveau point à l'aide des vitesses de DARCY (cf. 3.2.1.2., a)	EPS1 =	17 à 24	25 à 32	flottant	0.001
3) ε_2 : erreur tolérée lorsque l'on se réajuste sur la courbe (cf. 3.2.1.2., b)	EPS2 =	33 à 40	41 à 48	flottant	EPS1/10
4) rayon du puits d'où partent les courbes de recyclage	RAYØN1=	49 à 56	57 à 64	flottant	0.1
5) rayon autour du puits d'où partent les courbes extérieures	RAYØN2=	65 à 72	73 à 80	flottant	RAYØN1

3ème carte FØRMAT(5(8X,G8.0))					
1) temps de parcours du front sur les lignes de courant à ne pas dépasser (si t ≥ TMAX on arrête le calcul de la ligne)	TMAX =	1 à 8	9 à 16	flottant	10.
2) nombre de pas de temps servant à fixer $\Delta t = \frac{\pi}{3}/NDT$ si le nombre fourni par l'utilisateur est trop faible pour donner des résultats satisfaisants, le programme calcule Δt automatiquement	NDT =	17 à 24	25 à 32	entier	30
3) facteur d'augmentation du pas de temps pour le calcul des lignes extérieures	FACDT =	33 à 40	41 à 48	flottant	1.
4) période de temps pendant laquelle on veut connaître l'évolution du front thermique. Si l'on veut l'évolution pour des dates précises, alors on donne une valeur négative quelconque à cette variable ; dans ce cas les dates désirées devront être fournies à raison d'une par carte dans le format (8X,G8.0), à partir de la 8ème carte	TFRØNT =	49 à 56	57 à 64	flottant	temps d'arrivée de la première courbe de recyclage
5) nombre de fronts thermiques désirés	NFRØNTS=	65 à 72	73 à 80	entier	
4ème carte FØRMAT(4(8X,G8.0))					
1) indicateur servant à commander la perforation de cartes pour ABAQUE et des sorties intermédiaires pour la maintenance du programme -1 : perforation 0 : ni perforation, ni sorties intermédiaires 1,2,3: sorties intermédiaires	IFIMP =	1 à 8	9 à 16	entier	
2) temps CPU (en secondes) que l'on ne veut pas dépasser	ITCPU =	17 à 24	25 à 32	entier	600"
3) nombre d'itérations maximum pour le calcul d'un point par la méthode expliquée au § 3.2.1.2.b	NITER =	33 à 40	41 à 48	entier	10
5ème carte FØRMAT (4(8X,G8.0))					
1) longueur en cm du cadre dans lequel sera tracée la courbe : TFD fonction de t_D. Si cette longueur est nulle, il n'y aura pas de tracé	NX1 =	1 à 8	9 à 16	entier	

2) hauteur du cadre (en cm)	NY1 =	17 à 27	25 à 32	entier	
3) nombre de modules sur l'axe des log.	XMØD =	33 à 40	41 à 48	flottant	
4) longueur sujet sur l'axe des y	Y1 =	49 à 56	57 à 64	flottant	
6ème carte FØRMAT (4,(8X,G8.0)) 1) longueur en cm du cadre dans lequel sont tracées les lignes de courant (si elle est nulle, il n'y a pas de tracé)	NX2 =	1 à 8	9 à 16	entier	
2) hauteur du cadre (en cm)	NY2 =	17 à 24	25 à 32	entier	
3) l'origine sujet étant au milieu du cadre : longueur ox	X2 =	33 à 40	41 à 48	flottant	
4) longueur oy (intervient dans le choix des ψ_n, cf. § 3.2.1.)	Y2 =	49 à 56	57 à 64	flottant	
7ème carte FØRMAT (4(8X,G8.0)) 1) longueur en cm du cadre dans lequel sont tracés les fronts (si elle est nulle il n'y a pas de tracé)	NX3 =	1 à 8	9 à 16	entier	
2) hauteur du cadre (en cm)	NY3 =	17 à 24	25 à 32	entier	
3) longueur sujet ox (o : milieu du cadre)	X3 =	33 à 40	41 à 48	flottant	
4) longueur sujet oy	Y3 =	49 à 56	57 à 64	flottant	
8ème carte et suivantes FØRMAT (8X,G8.0) date pour laquelle on veut la situation du front thermique. Ces cartes ne doivent être présentées que lorsque la valeur de TFRØNT (précisée dans la 3ème carte) est négative.	DATE =	1 à 8	9 à 16	flottant	

5. PROGRAMME ABAQUE

5.1. But d'ABAQUE

Ce programme trace dans un même cadre les différentes courbes TFD, fonction de TD, fournies par plusieurs passages de CADOUDAL avec l'option : perforation (IFIMP=-1). (annexe 5)

5.2. Utilisation d'ABAQUE

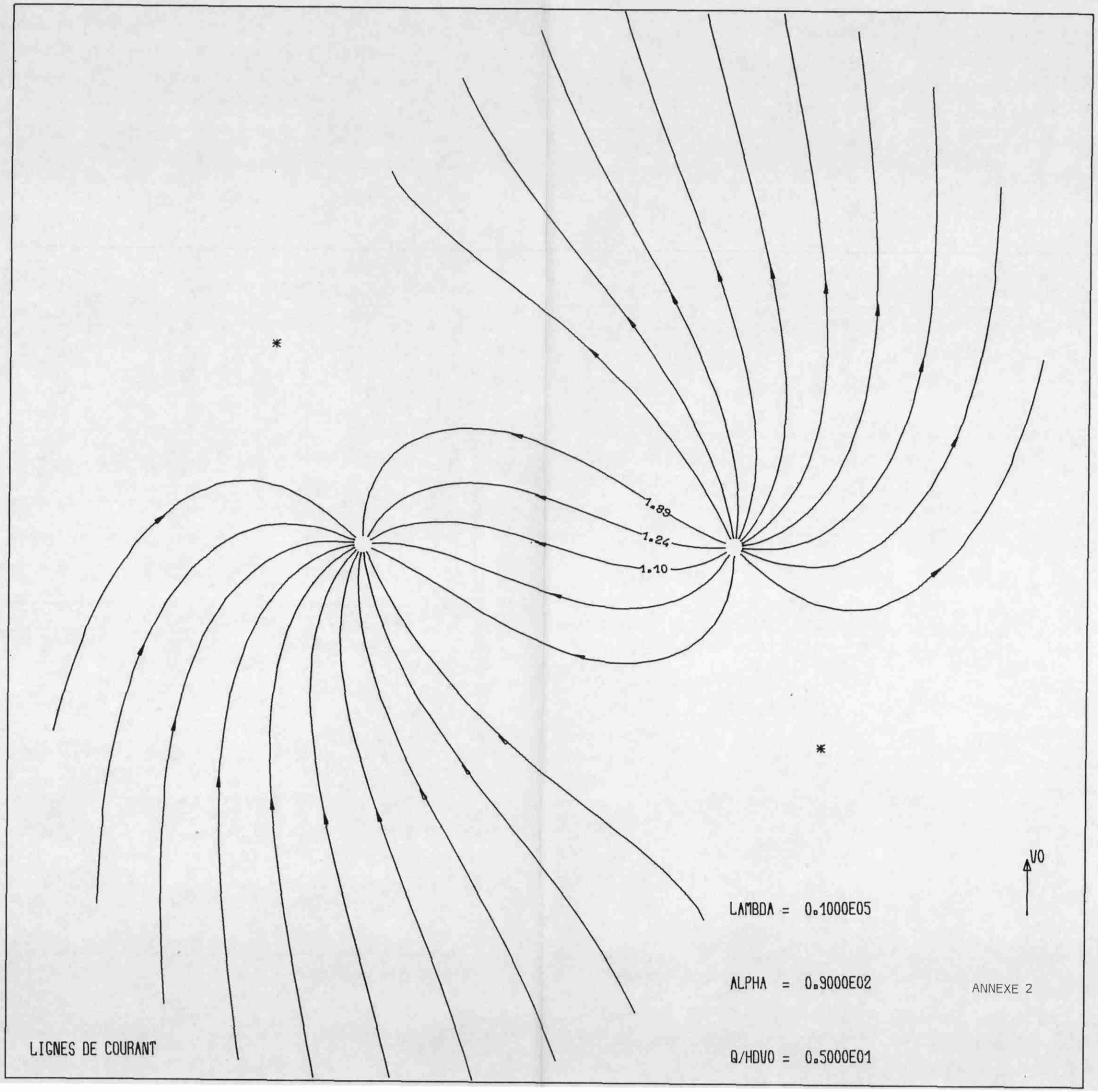
Il peut s'utiliser sans autres données que celles fournies par CADOUDAL rassemblées en un seul paquet. On fait précéder ces données par une carte contenant un point-virgule perforé dans n'importe quelle colonne.

On peut cependant introduire un coefficient : RØ pour faire le changement de variable : TD = RØ * TD ; il suffit d'écrire sur la 1ère carte avant le point-virgule : RØ = valeur.

COORDONNEES DES LIGNES DE COURANT

ALPHA = 90.00 DEGRES
C/FDVO= 3.000 00
TEMPS = 1.210 00
PSI = -5.000-01

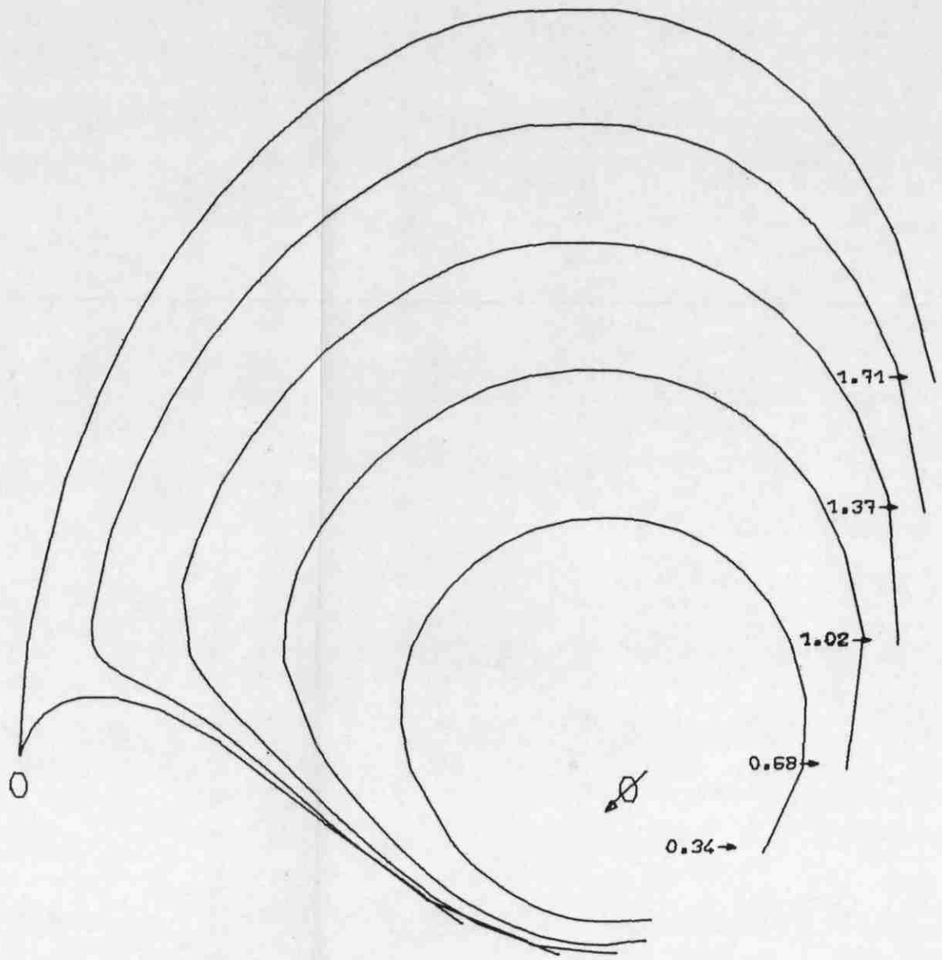
X	Y	TEMPS (LIGNE 1)
0.970	-0.040	0.0
0.933	-0.090	0.777239E-02
0.889	-0.130	0.216926E-01
0.844	-0.160	0.392005E-01
0.800	-0.182	0.593022E-01
0.756	-0.197	0.813696E-01
0.711	-0.210	0.105423E 00
0.667	-0.214	0.131140E 00
0.622	-0.218	0.157523E 00
0.578	-0.214	0.185393E 00
0.533	-0.211	0.213692E 00
0.489	-0.203	0.243394E 00
0.444	-0.194	0.273305E 00
0.400	-0.181	0.304605E 00
0.356	-0.165	0.336588E 00
0.311	-0.152	0.366374E 00
0.267	-0.133	0.401599E 00
0.222	-0.113	0.435315E 00
0.178	-0.091	0.469447E 00
0.133	-0.069	0.503912E 00
0.089	-0.046	0.538621E 00
0.044	-0.023	0.573465E 00
0.0	0.0	0.608368E 00
-0.044	0.023	0.643272E 00
-0.089	0.046	0.678116E 00
-0.133	0.069	0.712824E 00
-0.178	0.091	0.747289E 00
-0.222	0.113	0.781422E 00
-0.267	0.133	0.815138E 00
-0.311	0.152	0.848363E 00
-0.356	0.165	0.880148E 00
-0.400	0.181	0.912131E 00
-0.444	0.194	0.943432E 00
-0.489	0.203	0.973342E 00
-0.533	0.211	0.100304E 01
-0.578	0.214	0.103134E 01
-0.622	0.218	0.105921E 01
-0.667	0.214	0.108560E 01
-0.711	0.210	0.111131E 01
-0.756	0.197	0.113537E 01
-0.800	0.182	0.115743E 01
-0.844	0.160	0.117754E 01
-0.889	0.130	0.119504E 01
-0.933	0.090	0.120856E 01
-0.970	0.040	0.121674E 01


1.89
1.24
1.10
V0
LAMBDA = 0.1000E05
ALPHA = 0.9000E02
Q/HDV0 = 0.5000E01
LIGNES DE COURANT

ANNEXE 2

TEMPERATURE AU PUITS DE PRODUCTION EN FONCTION DU TEMPS

TD	TFD		
		ALPHA =	90.00 DEGRES
		Q/HDVO=	3.000 00
		LAMBDA=	1.000 04
1.212	0.0		
1.218	0.024		
1.232	0.048		
1.261	0.072		
1.302	0.096		
1.357	0.120		
1.432	0.144		
1.534	0.168		
1.676	0.192		
1.876	0.216		
2.190	0.240		
2.790	0.264		
INFINI	0.288		



VO

LAMBDA = 0.1000E05

FRONTS THERMIQUES

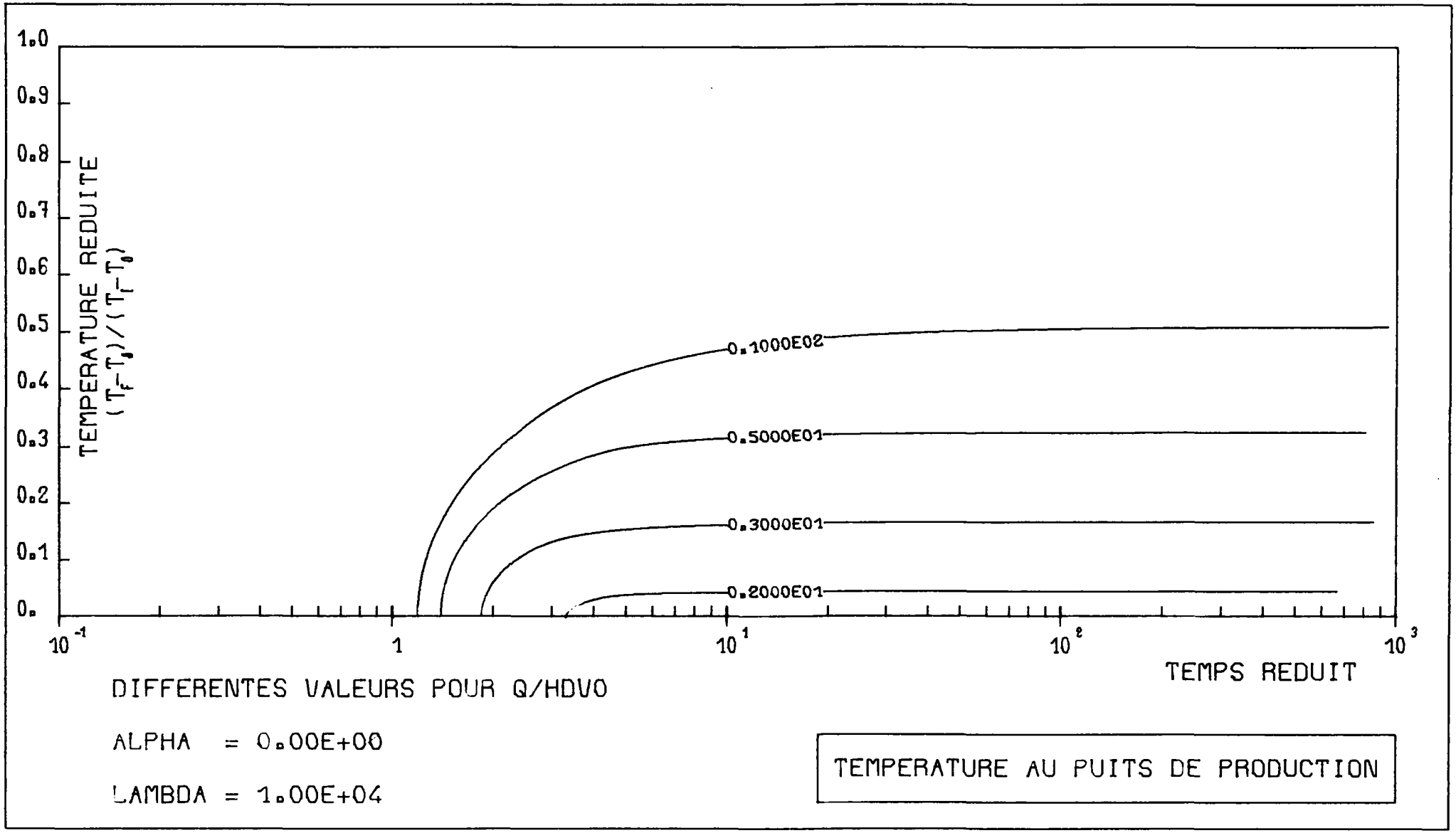
ALPHA = 0.9000E02

Q/HDVO = 0.2000E01

O : PUITS DE PRODUCTION

Ø : PUITS D'INJECTION

ANNEXE 4



ABAQUE 26/11/74 11.15.31 LANDEL